

INFLUENCIA DE LAS IRREGULARIDADES DE LA VIA
EN LA RESPUESTA DINAMICA DEL SISTEMA VEHICULO-
VIA-ESTRUCTURA EN PUENTES DE FERROCARRIL.

Alvarez, Ramón (E.T.S.Ingenieros Industriales. UPM)
Alarcón, Enrique (E.T.S.Ingenieros Industriales. UPM)
Molina, Javier (E.T.S.Ingenieros Industriales. UPM)

Resumen.— En el marco de la U.I.C. (Unión Internacional de Ferrocarriles) la Oficina de Investigación y Ensayo (O.R.E) está desarrollando la cuestión D-160, relativa al Cálculo de la Flecha admisible de los Puentes, en función de la confortabilidad de viajeros. El presente artículo expone algunos de los resultados obtenidos con los programas desarrollados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

1. INTRODUCCION

El comportamiento dinámico del sistema tren-estructura en puentes de ferrocarril constituye sin duda uno de los problemas clásicos de la Ingeniería Civil.

Una de las entidades que en los últimos tiempos han contribuido en mayor medida al estudio del problema ha sido sin duda la Unión Internationale des Chemins de Fer.

Ya en la actualidad, este organismo ha lanzado, a través de su oficina técnica O.R.E. (Office de Recherches et d'Essais). - La cuestión D-160, referente al estudio de la flecha máxima admisible en relación a la comodidad del pasajero.

Con este motivo se invitó a una serie de centros de investigación Europeos a desarrollar un programa que abordase el cálculo dinámico del sistema.

Entre los centros seleccionados se encuentra la Cátedra de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, de Madrid, a la cual pertenecen los autores de la presente comunicación.

Se pretende en este artículo dar una visión general de los trabajos realizados en esta dirección. Es por ello que los apartados 2 y 3 se dedicarán a la descripción breve de los dos programas más significativos de entre los realizados. El apartado 4 presenta las principales características de uno de los problemas estudiados, el del puente de Hörstel, en la R.F.A. Por último, en el último apartado se representan algunos de los resultados y conclusiones obtenidos.

Entre éstos, cabe destacar la importancia fundamental que tiene la correcta modelización del estado de la vía.

2. PROGRAMA "PUENTE". DESCRIPCION

Se trata de una integración directa en el tiempo de las ecuaciones del sistema. Dichas ecuaciones se obtienen a través de una formulación clásica de Rayleigh-Ritz (con alguna diferencia que se reseña a continuación).

Entre las aportaciones más originales, cabe destacar la utilización de funciones de forma móviles para modelizar los efectos locales bajo las ruedas.

Esta dependencia de las funciones de forma con el tiempo introduce asimetrías en las matrices del sistema, con las inevitables y molestas consecuencias que ello conlleva.

[3]. Una discusión más amplia de estos aspectos puede verse en

Otras características del programa son la biblioteca de elementos (entre los que se incluyen lineales, no lineales, plásticos, elasto-plásticos, ... etc.), el paquete de subrutinas de optimización de memoria, las distintas posibilidades en cuanto a los parámetros de la integración, etc.

Un aspecto muy parcial del programa, pero de capital importancia en el caso tratado, es la modelización de las irregularidades de la vía y de las ruedas. Se lleva a cabo introduciendo fuerzas en los extremos del muelle rueda-vía de valor el producto de la irregularidad por la constante del muelle. En general, dicho muelle será un elemento no lineal (tope) de muy elevada rigidez a compresión y nula a tracción.

Cabe señalar por último que, más que un programa único, se trata de un sistema de subrutinas en continua evolución (actualmente se han desarrollado más de 200 subrutinas y 20.000 sentencias) que permiten una gran flexibilidad a la hora de adaptarse a las características de un problema concreto.

El lenguaje utilizado ha sido el FORTRAN-V, y el ordenador, un UNIVAC 1100/80 del Ministerio de Educación y Ciencia.

3. PROGRAMA "TRIGRA". DESCRIPCION

El programa "Puente", descrito en el anterior apartado, resulta, a causa de su propia naturaleza, lento y complejo. Piénsese que, en cada instante de tiempo han de resolverse, si existen elementos no lineales, varios sistemas de equilibrio (ya que las matrices del sistema son función de la solución, lo que conlleva un proceso iterativo).

Con el fin de evitar el costo que supondría obtener la necesaria experiencia en el problema a través de sucesivas pasadas de un programa tan completo, se procedió a la realización de una serie de programas más simples y baratos, que pudiesen in-

cluso ser ejecutado sobre microordenadores de bajo precio.

Entre ellos, el "TRIGRA", aquí descrito utiliza el método - de los elementos componentes (ver ref. 23).

Se integra en el tiempo, y de forma directa, un sistema discreto lineal, formado por masas y muelles.

La excitación está constituida por el movimiento que en cada instante se les impone a los grados de libertad deseados.

En nuestro caso concreto, el modelo utilizado fué el representado en la figura 1.

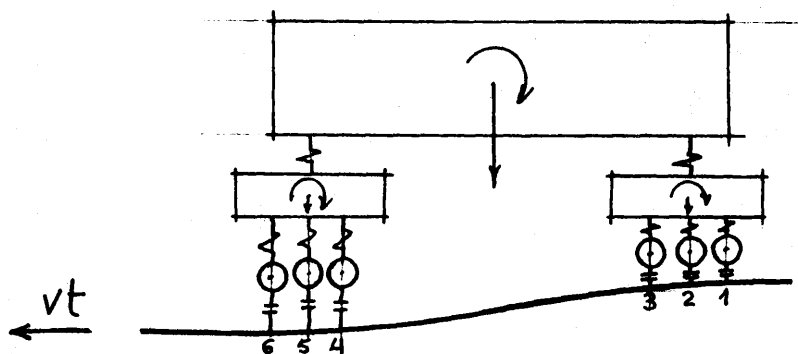


Fig. 1.- Modelo (programa "TRIGRA")

En él, los bloques representan la caja, los bogies y las - ruedas de la locomotora (evidentemente la caja se considera como rígida). El muelle que une las ruedas a la curva modeliza la rigidez del balasto.

A éstas se las hace seguir una trayectoria determinada, que, en nuestro caso, son la de los puntos de aplicación de un sistema de fuerzas sin masa que atraviesan la viga a velocidad - constante.

En dicho sistema va incluido la locomotora y los dos vagones que componen el tren de prueba.

Además, sobre estas trayectorias pueden ser superpuestos - cualesquiera otros efectos, tales como irregularidades, esfuerzos de frenado, etc.

En la figura 2 pueden verse las trayectorias utilizadas.

El programa ha sido realizado en lenguaje BASIC sobre un - microordenador HEWLETT-PACKARD 9836.

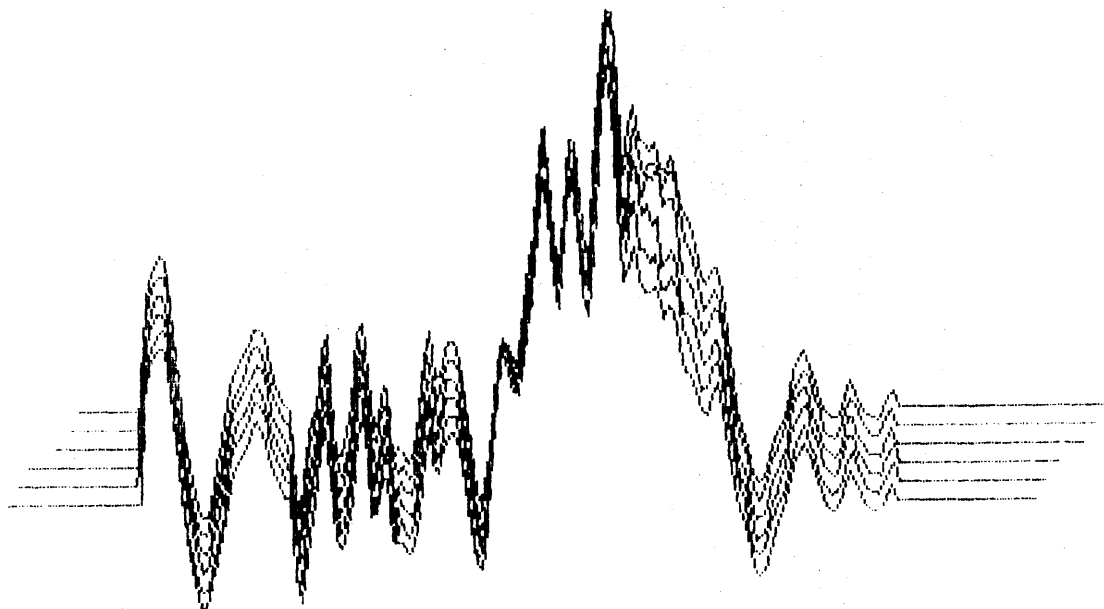


Fig. 2.- Trayectorias que se obliga a seguir a cada uno de los puntos 1-6 de la figura anterior. Incluyen irregularidades.

4. DESCRIPCION DEL PROBLEMA CONSIDERADO

El puente de Hörstel, en la República Federal de Alemania, es - una estructura metálica clásica.

La disposición constructiva es la típica de los puentes en celosía, realizándose la transmisión de esfuerzos en el sentido vía, traviesa, largueros, viguetas, cuchillos. Es de destacar - que en este caso no existe un balasto que redistribuya las presiones, las traviesas descansan directamente sobre los largueros.

La modelización se ha llevado a cabo en forma similar a - otros ejemplos tratados con anterioridad (ver referencias 3 a 5).

En este caso, la característica distintiva era la presencia de irregularidades. Efectivamente, se disponía de un listado - de las alturas relativas de cada vía en un tramo que incluía al puente y sendas longitudes antes y después de éste. Las medidas estaban realizadas a intervalos de 20 centímetros.

Como quiera que inicialmente se pensaba que las irregularidades tendrían una importancia limitada, y dado el volumen de - datos que representaban (más de 2.000 cifras), se hizo necesario recurrir a simplificaciones.

Para el programa "PUENTE", dado que se basa en una modelización de tipo plano, se tomó como listado de irregularidades el correspondiente a una de las vías, en vez de hacer una media entre las dos como hubiera sido más lógico.

Para el programa "TRIGRA", además de lo anterior, se tomó tan sólo una medición de cada cinco. Naturalmente, ello implica que al programa se le está dando una curva menos "suave" que al programa "PUENTE", por lo que eran de esperar respuestas del sistema algo mayores. Naturalmente, los pasos de integración son, en ambos programas, inferiores a las distancias consideradas y los puntos intermedios eran obtenidos por interpolación lineal.

Al objeto de que en el momento de entrar al puente el tren se encuentre en unas condiciones en movimiento aproximadas a la realidad, se dispone un tramo de lanzamiento inicial.

En el programa grande dicho tramo está limitado por el tiempo empleado en la integración en él.

En el pequeño, ésta limitación no tiene mayor importancia - (es un programa más simple y por tanto más rápido).

El resto de las características del problema eran, en una relación rápida:

Longitud del puente: 52 metros.

Rigidez de Balasto: 2,55 E8 Nw/m.

Amortiguamiento relativo: 0,1%.

Inercia de la viga: $1,22 \text{ m}^4$.

Número de modos considerados en la viga: 3.

Las características del tren de pruebas pueden verse en las referencias 3 y 4.

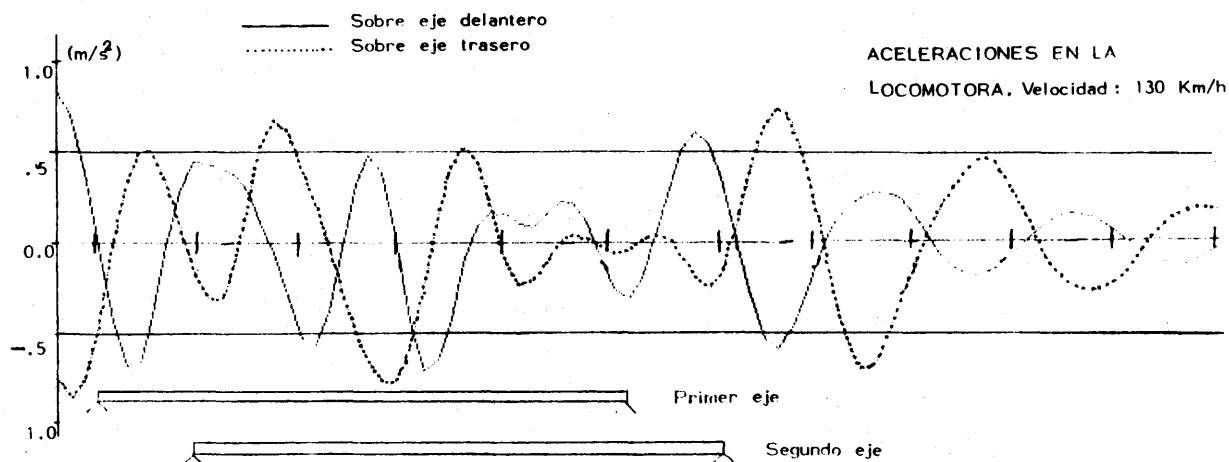
La rigidez del balasto se ha obtenido por medida de la flecha entre la vía y los cuchillos principales. No se refiere - por tanto al balasto, sino al conjunto de elementos intermedios.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

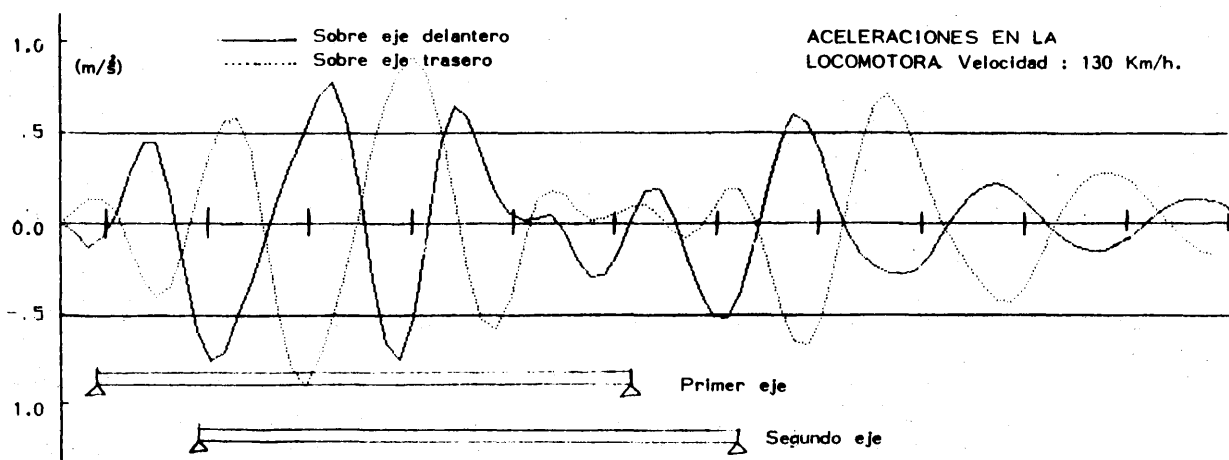
Tal y como se adelantó en anteriores apartados, resultó en principio sorprendente la influencia de las irregularidades de la vía en el comportamiento dinámico del tren, influencia que llegaba hasta el punto de no poderse apreciar, en las gráficas de respuesta, la situación del puente.

Tal importancia resulta más evidente si se piensa que el listado de irregularidades presenta variaciones de $\pm 0,5 \text{ cm}$ en periodos de 10-15 metros, y ello frente a una flecha del puente del orden de $1,5 \text{ cm}$ en 50 metros.

Así las cosas, el problema de la interacción tren-estructura en los puentes, se presenta fundamentalmente como un problema de condiciones iniciales.



longitud de lanzamiento: 75 m.



longitud de lanzamiento: 5 m.

Fig. 3.- Respuestas obtenidas con el programa "TRIGRA", variando la distancia de lanzamiento.

En este sentido, la figura 3 muestra la respuesta, calculada con el programa pequeño, sobre la locomotora. La única diferencia entre la forma de cálculo de las dos gráficas, ha sido el cambio de las longitudes de lanzamiento. Como puede observarse, los cambios tanto en la forma como en la amplitud de la respuesta son notorios.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos con el programa grande, considerando un tramo de lanzamiento de tan sólo 5 - metros, que ha resultado ser claramente insuficiente. Se dibujan las respuestas de la locomotora y del primer coche.

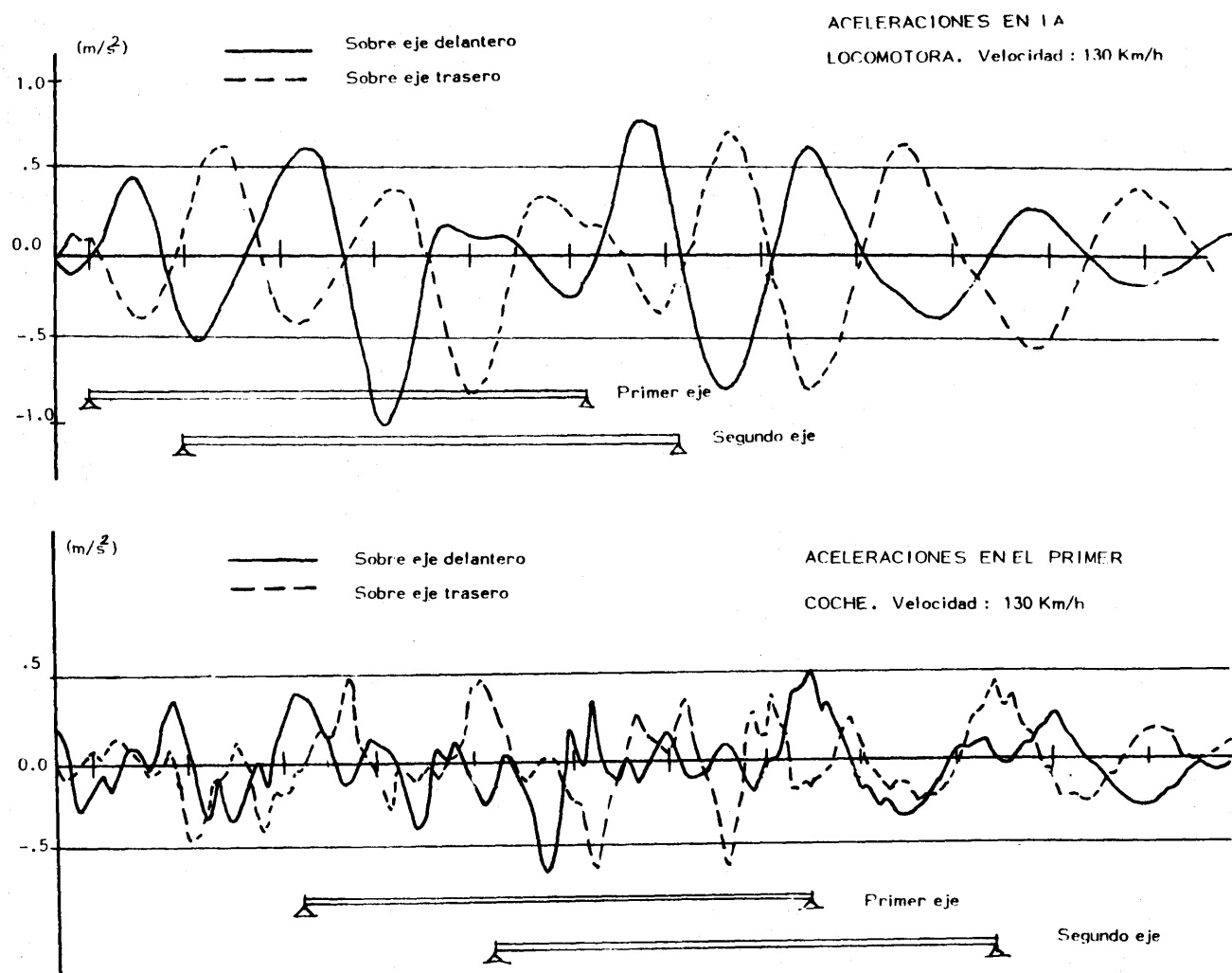


Fig. 4.- Respuestas de la locomotora y del primer coche.

La figura 5 muestra la respuesta de la estructura.

Todos los resultados señalados han sido obtenidos para una - velocidad del tren de 130 Km/h.

En un abanico de velocidades entre 100 Km/h y 160 Km/h, la - tónica general de las respuestas se mantiene inalterable. Como - ejemplo, la figura 6 muestra la respuesta de la locomotora pasando sobre el puente a 160 Km/h.

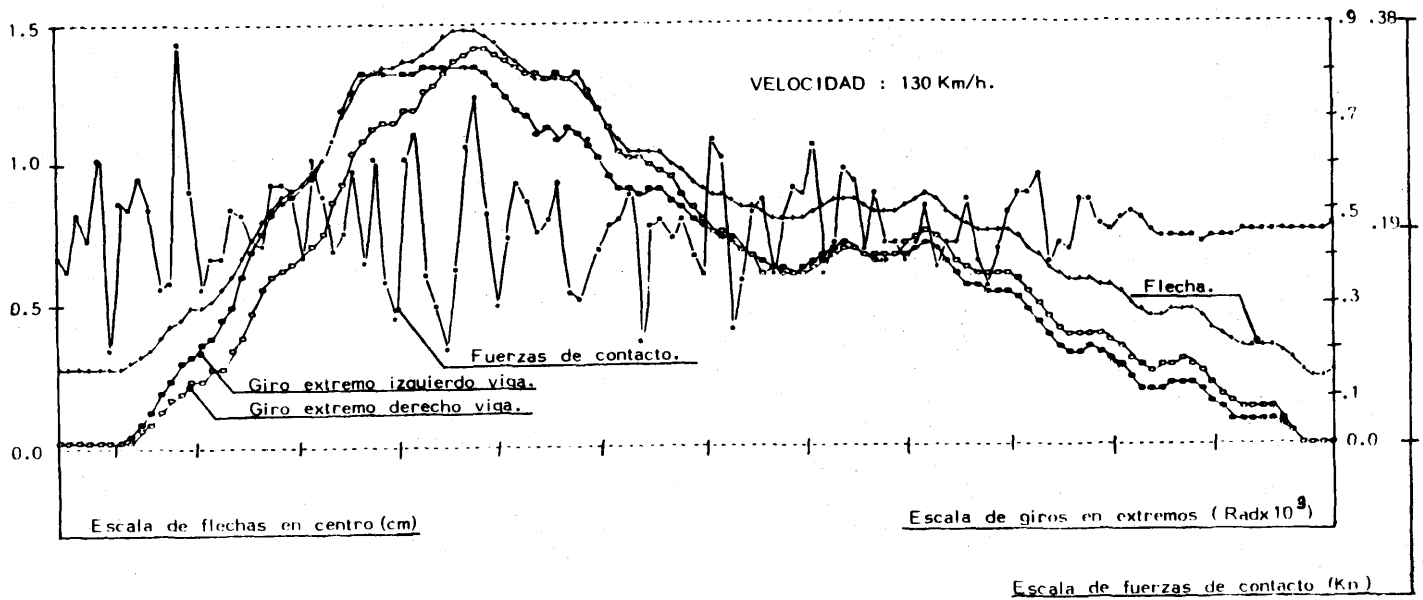


Fig. 5.- Respuesta de la estructura.

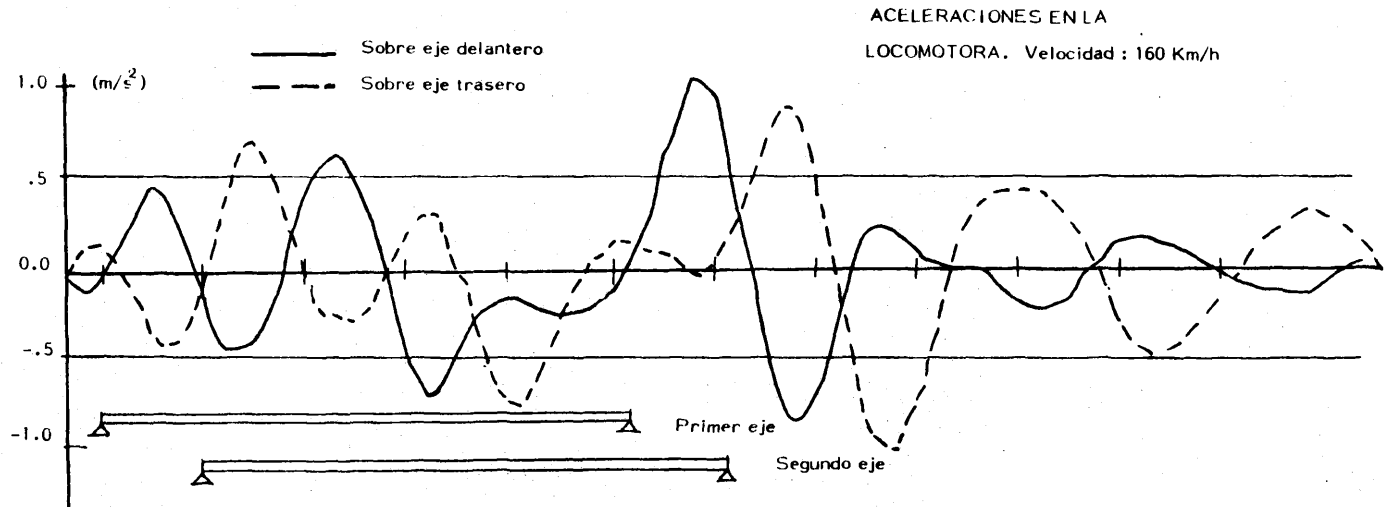


Fig. 6.- Respuesta de la locomotora circulando a 160 Km/h.

BIBLIOGRAFIA

1. Anónimo. Revista de obras públicas N.2. (1853).
2. Alarcón, E. "Efectos Dinámicos en los Puentes". Tesis - Doctoral. E.T.S.I. Caminos. (U.P.M.). (1970).
3. Alarcón, E., Alvarez, R., Doblaré, M., Molina, J. "Interacción dinámica Vehículo-Vía-Estructura-Cimiento en Puentes de Ferrocarril". Anales de Ingeniería Mecánica. Año 1/Número 1/Diciembre 1983. pp. 451-460.
4. Alarcón, E., Alvarez, R., Doblaré, M., Molina, J. "Efectos dinámicos en Puentes de Ferrocarril". Memoria de Ponencias presentadas en la XII Asamblea Técnica Nacional de la Asociación Técnica Española del Pretensado.
5. Alvarez, R. "Interacción Dinámica Vehículo-Vía-Estructura en Puentes de ferrocarril". Tesis doctoral. E.T.S.I. Industriales. (U.P.M.). (1984).
6. Argyris, J.H., Dunne, P.C and Angelopoulos, T. "Dynamic Response by Large Step Integration". Earthq. Engng. - Struct. Dyn. Vol. 1, pp. 283-291. (1973).
7. Bathe, K.J. and Wilson, E.L. "Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods". Earthq. Engng. - Struct. Dyn. Vol. 1, pp. 283-291. (1973).
8. Biggs, Suer and Low. "The Vibration of Simple Span Highway Bridges". Proc. A.S.C.E. Structural Division. (March 1957).
9. Bleich. "Theorie und Berechnung der Eisernen Brucken". Springer. (1924).
10. Chiu, W.S., Smith, R.G. and Wormley, D.W. "Influence of Vehicle and Distributed Guideway Parameters on High Speed Vehicle-Guideway Dynamic Interactions". ASME. J. of Dynam. Syst. Meas. and Control. March. pp. 25-34. (1971).
11. Department of Transport "Proceeding of the Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges". TRRL. Supplementary Report SR 275 Crowthorne. England. (1977).
12. Fleming and Romualdi. "Dynamic Response of Highway Bridges". Proc. ASCE. J. Structural Division. (Oct. 1961).
13. Fryba, L. "Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads". Noordhoff Int. (1972).
14. Hunley, J.B. "Impact in Steel Railway Bridges of Simple Span". American Railway engineering Association. (1935).
15. Inglis, C.E. "A Mathematical Treatise on Vibrations in - Railway Bridges". Cambridge Univ. Press. (1934).

16. Kortum, W. and Richter, R. "Simulation of Multibody - Vehicles Moving over Elastic Guideways". Vehicle System Dynamics Vol. 6, pp. 21-35. (1977).
17. Kortum, W. and Wormley, D.N. "Dynamic Interactions Between Travelling Vehicles and Guideway Systems". Vehicle System Dynamics Vol. 10. pp. 285-317. (1981).
18. Machida, F. and Matsuura. "Dynamic Response of Concrete Railway Bridges". IABSE Periodica. (2/1983).
19. Ministry of Transport. "Test on Railway bridges in Respect of Impact Effect". Advisory Committee for the revision of the board of trade requirements 1914 in regard to the opening of railways. H.M. Stationery Office. London (1921).
20. O.R.E.-U.I.C. "Fleche admissible des ponts". Question - D-160. Rapport N. 1 (1983).
21. O.R.E.-U.I.C. "Fleche admissible des ponts". Question - D-160. Rapport N. 2, Enero: "Analyse des Programmes de Calcul Existents". (1984).
22. Tilly, G.P., Cullington, D.W., Eyre, R. "Dynamic behavior of footbridges". IABSE Periodica, Vol. 2. (1984).
23. Levy, S., Wilkinson, J.P.D. "The Component Element Method in Dynamics". McGraw-Hill. (1976).